

Studi Biaya Transmisi di Sistem Kelistrikan Jawa-Bali Karena Injeksi Daya di Sistem 150 kV Menggunakan *Sequential Quadratic Programming*

Sampulur Kerta Sugih Harta, Rony Seto Wibowo, R. Wahyudi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: ronyseto@ee.its.ac.id, sampulurksh@gmail.com, wahyudi@ee.its.ac.id

Abstract—Saat ini konsep *Power Wheeling* sedang dalam perintisan untuk dapat diimplementasikan di Indonesia, terutama pada sistem jaringan transmisi. Maka diperlukan suatu metode perhitungan untuk mengetahui besar biaya *Power Wheeling*. Salah satu metode perhitungan yang dapat mencakup biaya tetap saluran transmisi berdasarkan penggunaan sebenarnya pada jaringan transmisi adalah metode perhitungan MW-Mile. Metode MW-Mile sendiri terdiri dari tiga pendekatan, yakni MW-Mile Reserve, MW-Mile Absolute, MW-Mile Dominant. Adapun metode LMP yaitu biaya tambahan untuk menyediakan daya tambahan satu MW pada titik tertentu. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing metode pendekatan MW-Mile serta mengetahui pengaruh *Power Wheeling* terhadap aliran daya saluran dan *losses* sistem. Pengujian dan analisis dilakukan pada sistem kelistrikan 150 kV Krian-Gresik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pendekatan MW-Mile reserve merupakan metode perhitungan paling adil bagi pengguna dan pemilik jaringan transmisi karena besar biaya *Power Wheeling* sesuai dengan perubahan tingkat pembebanan saluran transmisi. Implementasi *Power Wheeling* dapat mempengaruhi aliran daya saluran dan *losses* sistem.

Kata kunci—*Power Wheeling*, MW-Mile reserve, MW-Mile Absolute, MW-Mile Reserve, LMP, studi aliran daya, *losses* sistem.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik masyarakat Indonesia mengalami kenaikan setiap tahunnya. Menurut RUPTL PT. PLN 2013-2022, antara tahun 2008 dan 2012, penjualan listrik meningkat dari 128 TWh pada 2008 menjadi 172 TWh pada 2012 dan jumlah pelanggan meningkat dari 39 juta pada 2008 menjadi 50 juta pada 2012. Konsumsi energi listrik Indonesia diperkirakan akan meningkat dari 189 TWh menjadi 386 TWh. Sedangkan, kebutuhan listrik Jawa-Bali diperkirakan akan meningkat dari 144 TWh menjadi 275 TWh. Untuk melayani pertumbuhan kebutuhan listrik tersebut, diperlukan tambahan kapasitas pembangkit sebanyak 59,5 GW untuk seluruh Indonesia, atau pertambahan kapasitas rata-rata mencapai 6 GW per tahun.

Power wheeling merupakan pemanfaatan bersama suatu jaringan tenaga listrik oleh pihak penyedia listrik lain sebagai suatu alternatif permasalahan penyediaan pasokan serta keandalan sistem tenaga listrik. Definisi lain adalah penggunaan jaringan

transmisi atau distribusi untuk mengirimkan daya listrik dari dan ke entitas lain (Merill, 1989) atau pengiriman daya listrik dari penjual ke pembeli melalui jaringan yang dimiliki oleh pihak ketiga (Sood, 2002).

Dalam tugas akhir ini akan diberikan salah satu alternatif dalam hal perhitungan harga dari sewa transmisi akibat injeksi daya atau transaksi daya di sistem 150 kV menggunakan Metode MW-Mile yang harapannya bisa dijadikan landasan atau gambaran jika diaplikasikan di kehidupan nyata, adapun jaringan tenaga listrik yang dipakai pada Tugas Akhir ini menggunakan sistem jaringan tenaga listrik 500 kV Jawa – Bali dan 150 kV Krian – Gresik.

II. TRANSMISI BERBAYAR DAN METODE PENENTUAN HARGA

A. Optimal Power Flow

Persamaan dari optimal power flow dari segi biaya pembangkitan dapat direpresentasikan pada persamaan berikut ini:

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

dimana :

F_i = besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke- i (Rp)

P_i = daya output dari pembangkit ke- i (MW)

a_i , b_i , dan c_i = cost coefficient unit generator ke- i

Dalam menyelesaikan suatu masalah optimasi, seperti OPF, ada dua batasan, yakni *equality* dan *inequality constraints*. *Equality constraints* merupakan batasan yang harus diikuti, seperti persamaan keseimbangan daya (*power balance*) aktif dan reaktif pada sistem. Sedangkan didalam ketetapan, *inequality constraints* boleh atau tidak mungkin mengikat[1].

Equality constraints (Batasan Persamaan)

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

Inequality constraints (Batasan Pertidaksamaan)

1. Batasan kapasitas pembangkit:

$$P_{gi} \min \leq P_{gi} \leq P_{gi} \max \quad (4)$$

$$Q_{gi} \min \leq Q_{gi} \leq Q_{gi} \max \quad (5)$$

2. Batasan tegangan:

$$V_i \min \leq V_i \leq V_i \max \quad (6)$$

3. Batasan saluran transmisi:

$$S_i \leq S_i \max \quad (7)$$

B. Optimisasi Sequential Quadratic Programming (SQP)

Sequential Quadratic Programming (SQP) adalah metode paling populer untuk *nonlinear constrained optimization*. Metode SQP bekerja dengan mengkonversi fungsi-fungsi umum menjadi fungsi kuadrat. Metode ini menghasilkan subproblem dari quadratic programming pada tiap iterasi, dan solusi dari subproblem ini dapat digunakan untuk menentukan nilai taksiran dari solusi di iterasi berikutnya[2]. Algoritma SQP dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$F(x) = f + g^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad (6)$$

Batasan dalam SQP dapat dibedakan menjadi 2, yaitu *equality constraint* dan *inequality constraint*, sesuai dengan kebutuhan perhitungan. Batasan *equality constraint* pada persamaan (2) sedangkan untuk *inequality constraint* pada persamaan (5).

- *Equality constraint*
Value untuk *equality constraint*: $lb = ub = b_{eq}$ (7)
Maka:

$$b_{eq} \leq Ax \leq b_{eq} \quad (8)$$

$$Ax = b_{eq} \quad (9)$$

- *Inequality constraint*
Value untuk *inequality constraint*: $lb < ub$ (10)
Maka:

$$lb \leq Ax \leq ub \quad (11)$$

C. Metode MW-Mile

Metode MW-Mile merupakan metode *embedded cost* yang juga dikenal sebagai metode *line-by-line* karena memperhitungkan biaya aliran daya transmisi dalam MW dan panjang saluran transmisi dalam mil. Metode ini mempertimbangkan biaya yang berhubungan dengan setiap transaksi wheeling berdasarkan penggunaan kapasitas transmisi sebagai fungsi dari besar daya transaksi, jalur yang digunakan dan jarak saluran transmisi yang dilalui[3]. Secara umum, persamaan untuk metode MW-Mile adalah :

$$TC_1 = \frac{\sum_{k \in K} c_k L_k MW_{t,k}}{P_i} \quad (12)$$

Dengan,

TC_1 = Total biaya teralokasi untuk transaksi t dalam rupiah

L_k = panjang saluran dalam k mil,

c_k = biaya per MW per satuan panjang saluran k,

$MW_{t,k}$ = aliran daya pada saluran k karena transaksi t,

P_i = kapasitas saluran, atau kapasitas saluran tidak terpakai, atau saluran terpakai pada saluran i.

Pada metode MW-mile terdapat tiga pendekatan tentang bagaimana hubungan biaya pada tiap saluran dialokasikan pada seluruh pengguna jaringan transmisi yaitu:

a. Reverse MW-Mile Approach

$$P_i^k = +P_i^k \text{ atau } -P_i^k$$

Dengan P_i^k adalah perubahan aliran daya pada saluran i yang disebabkan oleh pengguna k, sehingga jika nilai saluran bertambah setelah diimplementasikan *Power Wheeling* maka nilai P_i^k akan menjadi $+P_i^k$. Sebaliknya jika nilai aliran daya berkurang setelah diimplementasikan *Power Wheeling* maka nilai P_i^k akan menjadi $-P_i^k$.

b. Absolute MW-Mile Approach

$$P_i^k = |P_i^k|$$

Dengan P_i^k adalah perubahan aliran daya pada saluran i yang disebabkan oleh pengguna k, sehingga jika aliran daya pada saluran i bertambah atau berkurang maka nilai P_i^k akan selalu positif dengan besaran sesuai dengan besar aliran daya yang berubah pada saluran i yang disebabkan oleh pengguna k.

c. Dominant MW-Mile Approach

$$P_i^k = +P_i^k \text{ atau } 0$$

Dengan P_i^k adalah perubahan aliran daya pada saluran i yang disebabkan oleh pengguna k, sehingga jika nilai saluran bertambah setelah diimplementasikan *Power Wheeling* maka nilai P_i^k akan menjadi $+P_i^k$. Sebaliknya jika nilai aliran daya berkurang setelah diimplementasikan *Power Wheeling* maka nilai P_i^k akan menjadi 0[4].

D. Nilai Variabel P_i^k Pada Metode MW-Mile

Pada metode MW-Mile terdapat tiga pendekatan tentang besar nilai variabel pembagi atau P_i (Orfanos, 2013), yaitu :

1. Total Capacity

Pada pendekatan ini P_i adalah kapasitas total saluran i, yang berarti daya maksimal yang dapat melewati saluran i dengan nominal tegangan yang sudah ditentukan.

2. Used Capacity

Pada pendekatan ini P_i adalah nilai daya yang mengalir pada saluran i sebelum diimplementasikan *Power Wheeling*.

3. Unused Capacity

Pada pendekatan ini P_i adalah nilai hasil dari selisih antara kapasitas total saluran i dengan daya yang mengalir pada saluran i sebelum diimplementasikannya *Power Wheeling*[5].

E. Locational Marginal Price (LMP)

Locational Marginal Price (LMP) adalah biaya tambahan untuk menyediakan daya tambahan satu MW pada titik tertentu. Nilai LMP pada setiap titik atau bus atau zona berbeda-beda dikarenakan adanya batasan aliran daya dari setiap saluran, hal ini yang dapat menyebabkan kemungkinan adanya biaya kemacetan.

Dalam situasi yang dibatasi, setiap pelaku pasar dikenai biaya kemacetan didasarkan pada nilai MWh dari pembangkit yang digunakan untuk menyuplai beban tersebut. Biaya akan didasarkan pada MWh dan perbedaan injeksi LMP. Jika besarnya nilai daya yang dibangkitkan tidak sama dengan permintaan beban (lebih

besar atau lebih kecil), maka FTR dapat menjual atau membeli energi ke “pasar spot”[3].

Net Paymen LMP antara 2 bus dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{Net Paymen LMP} = \text{amount of LMP} \times (LMP_1 - LMP_2) \quad (13)$$

Dimana: *amount of LMP* = besarnya daya yang ditransferkan dalam MW.

III. SISTEM KELISTRIKAN 500 KV JAWA – BALI DAN SUB SISTEM 150 KV KRIAN GRESIK

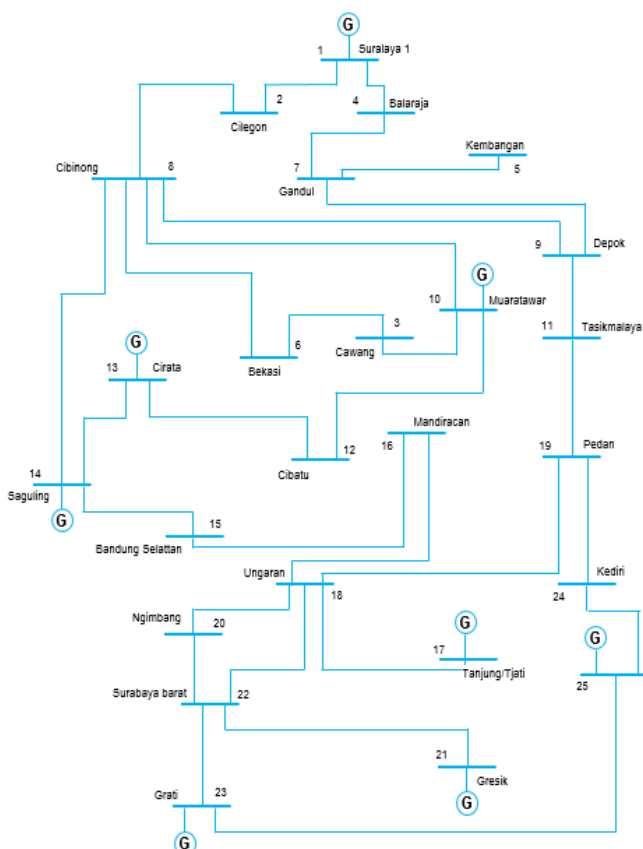
A. Sumber Data

Data yang digunakan adalah data sistem Jawa-Bali tahun 2014 yang dimiliki Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban (P3B) tertanggal 8 November 2014 ditambah dengan beberapa asumsi. Beberapa asumsi ditambah karena data yang dibutuhkan bersifat rahasia perusahaan atau belum ditetapkan dalam undang-undang ketenagalistrikan.

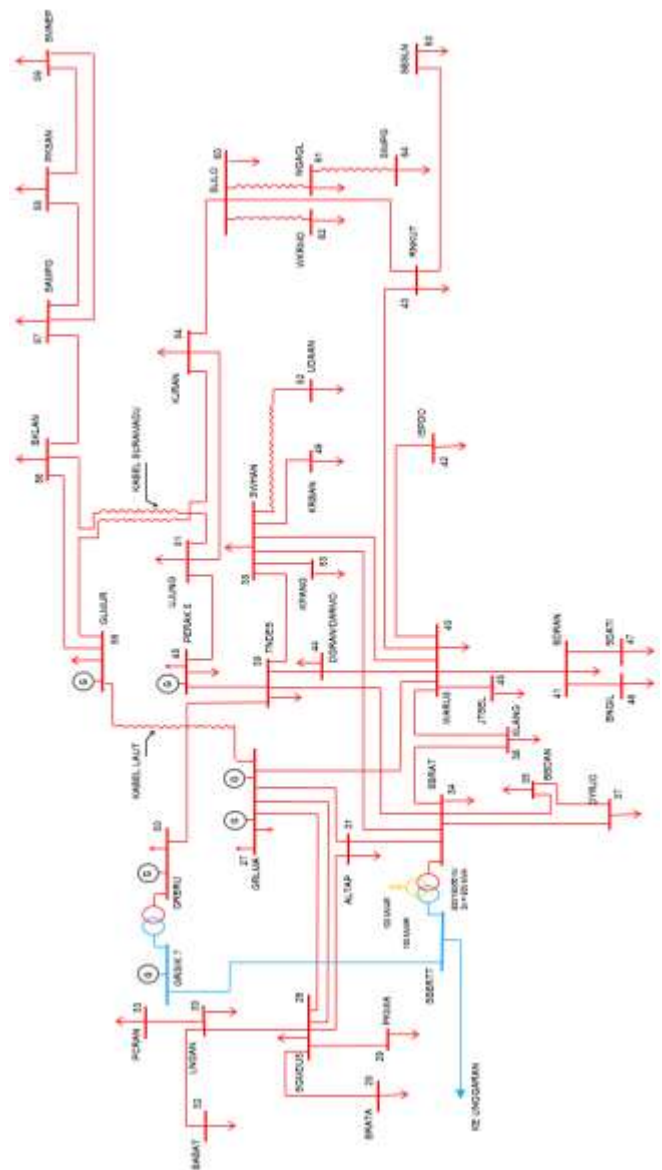
Pada penelitian ini, digunakan data pembebanan dalam kondisi beban puncak rata-rata pukul 18.00-22.00 WIB dan beban tidak puncak rata-rata pukul 09.00-15.00 WIB yang dikalkulasikan berdasarkan hari kerja (*weekday*) Senin – Jumat dan hari libur (*weekend*) Sabtu – Minggu.

B. Pembuatan Case Data Jawa – Bali & Krian Gresik

Untuk lebih memudahkan dalam memahami alur aliran daya maka dari itu dibuat single line diagram masing masing sistem baik 500 kV Jawa – Bali maupun 150 kV Krian & Gresik. Dibawah ini ialah *single line diagram* sistem transmisi 500 kV Jawa – Bali dan sub-sistem 150 kV Krian & Gresik.



Gambar 1 Single Line Diagram Sistem 500 kV Jawa – Bali



Gambar 2 Single Line Diagram Sistem 150 kV Krian & Gresik

C. Penerapan Skenario

Pada skenario ini, simulasi dilakukan dengan dua kondisi peletakan beban dan pembangkit pada sub-sistem 150 kV Krian-Gresik. Data penambahan beban digunakan dalam penelitian ini mengacu pada proposal PBJT tahun 2009. PT Ispat Indo yang terletak di Sidoaro - Surabaya memiliki beban sebesar 104 MW. Industri ini berencana untuk membangun pembangkit listrik yang terletak di Gresik untuk memasok bebannya sendiri melalui mekanisme *wheeling*.

Beban = 104 MW, Ispat Indo

Pembangkit = 104, Gresik

D. Perubahan Aliran Daya

Implementasi *Power Wheeling* menyebabkan aliran daya yang mengalir disetiap saluran pada sub-sistem 150 kV Krian-Gresik berubah. Perubahan nilai daya setelah implementasi *Power Wheeling* pada saat beban tidak penuh dapat dilihat pada tabel 4.3 dan saat beban penuh dapat dilihat pada tabel 4.4 dibawah ini.

Tabel 1
Selisih Perubahan Aliran Daya Sub-Sistem 150 kV Krian-Gresik
Setelah Injeksi Daya

From Bus	To Bus	Beban Tidak Penuh		Beban Penuh	
		Weekday	Weekend	Weekday	Weekend
		MW	MW	MW	MW
1	2	-0.064	-0.002	0.144	-0.004
1	2	-0.064	-0.002	0.144	-0.004
1	4	-0.146	0.001	0.314	-0.001
1	4	-0.146	0.001	0.314	-0.001
2	8	-0.126	-0.004	0.284	-0.014
6	8	0.013	0.005	-0.054	0.004
6	3	-0.013	-0.005	0.054	-0.004
7	4	0.145	-0.001	-0.310	0.004
7	4	0.146	-0.001	-0.312	0.004
7	5	1.63E-08	-2.4E-11	1.02E-12	2.34E-09
7	5	1.63E-08	-2.4E-11	1.02E-12	2.34E-09
8	14	-0.043	-0.022	0.186	-0.035
8	14	-0.041	-0.021	0.178	-0.034
9	8	0.002	-0.029	0.120	-0.038
9	8	0.002	-0.029	0.120	-0.038
9	7	0.145	-0.001	-0.311	0.004
9	7	0.145	-0.001	-0.311	0.004
10	8	0.024	0.012	-0.105	0.019
10	3	0.013	0.005	-0.054	0.005
11	9	0.147	-0.029	-0.191	-0.033
11	9	0.147	-0.029	-0.191	-0.033
12	13	-0.019	-0.010	0.080	-0.016
12	13	-0.019	-0.010	0.080	-0.016
12	10	0.019	0.010	-0.080	0.016
12	10	0.019	0.010	-0.080	0.016
14	15	-0.061	-0.032	0.263	-0.053
14	15	-0.061	-0.032	0.263	-0.053
14	13	0.019	0.010	-0.080	0.017
14	13	0.019	0.010	-0.080	0.017
16	15	0.061	0.032	-0.263	0.054
16	15	0.061	0.032	-0.263	0.054
16	18	-0.062	-0.034	0.266	-0.059
16	18	-0.062	-0.034	0.266	-0.060
18	19	-0.925	0.545	-0.048	1.061
18	20	1.212	2.085	2.248	2.518
18	17	-0.785	-2.346	-1.899	-3.071
18	17	-0.785	-2.346	-1.899	-3.071
19	24	-0.614	0.302	0.174	0.556
19	24	-0.614	0.302	0.174	0.556
19	11	0.149	-0.029	-0.193	-0.032
19	11	0.149	-0.029	-0.193	-0.032
20	22	1.234	2.146	2.295	2.580
21	22	-4.403	-3.612	-4.356	-3.665
21	22	-4.583	-3.760	-4.534	-3.815
22	18	-1.159	-1.989	-2.148	-2.407
22	23	-3.996	-1.579	-2.963	-1.239
22	23	-3.996	-1.579	-2.963	-1.239
25	23	4.041	1.608	3.008	1.272
25	23	4.041	1.608	3.008	1.272
25	24	0.627	-0.309	-0.178	-0.562
25	24	0.627	-0.309	-0.178	-0.562
22	34	1.434	0.011	1.554	0.081
21	50	3.139	3.728	3.713	3.747
26	28	5.30E-11	1.01E-10	-2.2E-10	1.48E-10
26	28	5.30E-11	1.01E-10	-2.2E-10	1.48E-10
26	29	5.62E-10	-3.1E-11	6.10E-12	3.08E-11
26	29	5.72E-10	-1.48E-11	9.01E-13	5.27E-11
27	26	11.329	11.362	11.321	11.357
27	26	11.329	11.362	11.321	11.357
27	26	7.753	7.779	7.748	7.776
26	30	-1.4E-06	9.86E-07	-1.5E-06	6.06E-06
26	30	-1.4E-06	9.86E-07	-1.5E-06	6.06E-06
26	31	15.21	15.25	15.19	15.24
30	32	2.96E-10	4.30E-13	-9.1E-12	5.49E-11
30	32	2.96E-10	4.30E-13	-9.1E-12	5.49E-11
30	33	5.61E-10	-4.2E-12	-8.4E-12	4.00E-11
30	33	5.61E-10	-4.2E-12	-8.4E-12	4.00E-11
31	34	23.672	23.743	23.655	23.732
31	34	23.672	23.743	23.655	23.732

Tabel 1
Selisih Perubahan Aliran Daya Sub-Sistem 150 kV Krian-Gresik
Setelah Injeksi Daya (Lanjutan)

From Bus	To Bus	Beban Tidak Penuh		Beban Penuh	
		Weekday	Weekend	Weekday	Weekend
		MW	MW	MW	MW
31	34	23.672	23.743	23.655	23.732
27	31	16.932	16.982	16.92	16.974
26	31	15.205	15.252	15.195	15.245
34	35	6.28E-08	-5.4E-07	-1.7E-07	-8.8E-07
37	35	-5.8E-08	5.40E-07	1.78E-07	8.85E-07
34	36	10.813	10.643	10.82	10.646
34	36	10.813	10.643	10.82	10.646
34	38	8.839	8.563	8.861	8.577
34	38	8.839	8.563	8.861	8.577
34	39	4.735	4.54	4.752	4.551
34	39	4.735	4.54	4.752	4.551
40	36	-10.809	-10.64	-10.815	-10.641
40	36	-10.809	-10.64	-10.815	-10.641
40	41	1.62E-07	8.67E-07	7.34E-07	2.18E-06
40	41	1.62E-07	8.67E-07	7.34E-07	2.18E-06
40	42	52	52	52	52
40	42	52	52	52	52
40	43	-6.502	-6.535	-6.511	-6.541
40	43	-6.502	-6.535	-6.511	-6.541
40	38	-9.397	-9.483	-9.391	-9.478
40	38	-9.397	-9.483	-9.391	-9.478
44	40	5.683	5.804	5.673	5.799
44	40	5.683	5.804	5.673	5.799
27	40	19.608	19.539	19.61	19.54
27	40	19.608	19.539	19.61	19.54
45	40	1.57E-12	4.29E-12	4.12E-12	3.22E-12
41	46	3.31E-10	-4.7E-13	-4.9E-12	3.60E-11
41	46	3.31E-10	-4.7E-13	-4.9E-12	3.60E-11
41	47	-2.8E-12	5.01E-12	-4.7E-12	-3.2E-12
41	47	-2.8E-12	5.01E-12	-4.7E-12	-3.2E-12
39	44	5.683	5.804	5.673	5.799
39	44	5.685	5.806	5.675	5.801
48	39	2.187	2.155	2.196	2.159
48	39	2.187	2.155	2.196	2.159
39	38	0.68	1.083	0.64	1.065
39	38	0.445	0.762	0.429	0.746
38	49	7.2E-10	2.60E-11	-1.1E-11	6.82E-11
38	49	7.2E-10	2.60E-11	-1.1E-11	6.82E-11
50	39	-1.349	0.067	-1.477	-0.008
48	51	-2.186	-2.154	-2.196	-2.159
48	51	-2.186	-2.154	-2.196	-2.159
38	52	3.59E-10	9.86E-11	-4.9E-11	1.40E-10
38	52	3.59E-10	9.86E-11	-4.9E-11	1.40E-10
38	53	4.29E-10	-2.5E-11	3.80E-11	6.48E-11
38	53	4.29E-10	-2.5E-11	3.80E-11	6.48E-11
54	51	-1.628	-1.654	-1.617	-1.65
55	56	5.998	5.961	6.001	5.96
27	55	8.706	8.705	8.721	8.714
27	55	8.706	8.705	8.721	8.714
51	56	-5.998	-5.961	-6.001	-5.96
54	55	-11.375	-11.415	-11.402	-11.43
57	58	-3.7E-07	8.10E-07	1.41E-07	2.21E-06
57	59	1.28E-07	-2.7E-07	-6.1E-09	-9.4E-08
57	56	2.63E-06	-5.7E-06	-2.2E-06	-3.4E-05
57	56	2.63E-06	-5.7E-06	-2.2E-06	-3.4E-05
58	59	-1.3E-07	2.77E-07	6.11E-09	9.50E-08
60	54	-6.501	-6.534	-6.509	-6.54
60	54	-6.501	-6.534	-6.509	-6.54
60	61	2.73E-08	1.59E-07	8.30E-08	2.52E-07
60	61	2.73E-08	1.59E-07	8.30E-08	2.52E-07
43	60	-6.501	-6.534	-6.509	-6.54
43	60	-6.501	-6.534	-6.509	-6.54
60	62	8.97E-10	-2.9E-11	7.66E-11	6.80E-11
60	62	8.97E-10	-2.9E-11	7.66E-11	6.80E-11
63	43	-4.0E-10	1.90E-12	-1.6E-12	-4.1E-11
63	43	-4.0E-10	1.90E-12	-1.6E-12	-4.1E-11
61	64	5.09E-10	3.02E-11	-5.7E-12	-2.0E-11
61	64	5.09E-10	3.02E-11	-5.7E-12	-2.0E-11
34	37	-1.1E-07	1.02E-06	3.02E-07	1.50E-06

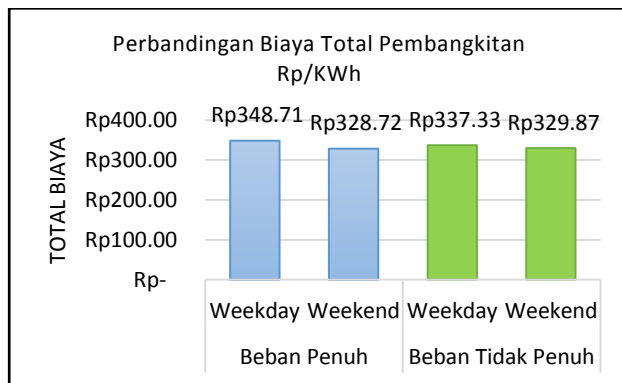
Peningkatan aliran daya paling signifikan terjadi di saluran Waru – Ispat Indo (Bus 40 – Bus 42) baik saat beban tidak penuh maupun beban penuh dengan total peningkatan sebesar 52 MW di masing – masing saluran. Hal ini disebabkan karena adanya tambahan beban di Ipat Indo sebesar 104 MW sesuai skenario yang diterapkan.

Penurunan aliran daya paling banyak terjadi pada saluran Kenjeran – Gili Timur baik saat beban tidak penuh maupun beban tidak penuh,

IV. ANALISA DATA

A. Biaya Pembangkitan

Total Biaya Pembangkitan setelah injeksi daya saat beban penuh dan beban tidak penuh dimasing-masing kondisi dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



Gambar 3 Grafik Perbandingan Biaya Pembangkitan

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa total biaya pembangkitan saat kondisi beban penuh lebih besar dibanding saat kondisi beban tidak penuh ini dikarenakan saat kondisi beban penuh besar daya yang dibangkitkan lebih besar dibanding saat kondisi beban tidak penuh.

B. Penerapan MW-Mile

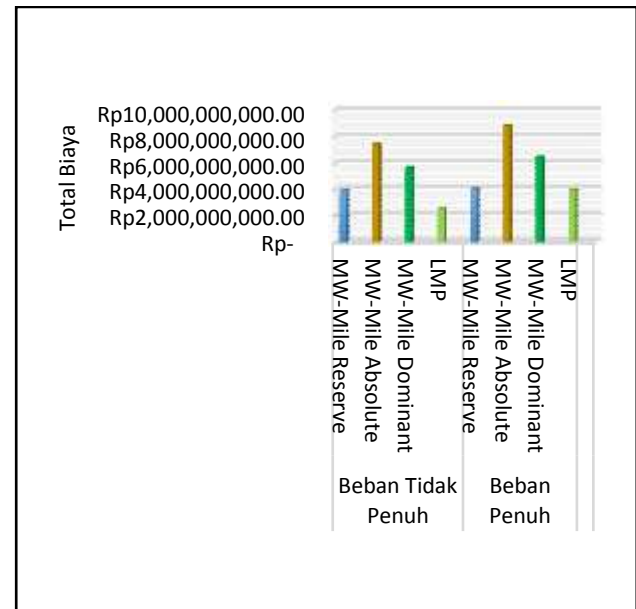
Total biaya transmisi menggunakan persamaan metode MW-Mile dengan pendekatan Reserve, Absolute, Dominant saat beban penuh dan saat beban tidak penuh selama setahun dapat dilihat di tabel dibawah ini.

Tabel 2
Biaya Power Wheeling Selama Setahun

No	Keadaan	Metode	Hari	Total Biaya (Rp)
1	Beban Tidak Penuh	MW-Mile Reserve	Weekday	Rp 3,980,263,177.84
			Weekend	
		MW-Mile Absolute	Weekday	Rp 7,428,120,427.70
			Weekend	
		MW-Mile Dominant	Weekday	Rp 5,704,191,802.77
			Weekend	
		LMP	Weekday	Rp 2,601,678,133.44
			Weekend	
2	Beban Penuh	MW-Mile Reserve	Weekday	Rp 4,111,179,141.89
			Weekend	
		MW-Mile Absolute	Weekday	Rp 8,846,274,970.43
			Weekend	
		MW-Mile Dominant	Weekday	Rp 6,502,892,362.05
			Weekend	
		LMP	Weekday	Rp 3,965,361,536.40
			Weekend	

Gambar 3, menjelaskan perbandingan besarnya harga sewa transmisi (*Power Wheeling*) setelah terjadi transaksi

injeksi daya saat beban penuh dan beban tidak penuh dijelaskan oleh gambar grafik berikut;



Gambar 4 Grafik Perbandingan Biaya Power Wheeling

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa saat beban penuh harga *wheeling* lebih mahal dibanding saat beban tidak penuh pada masing-masing metode.

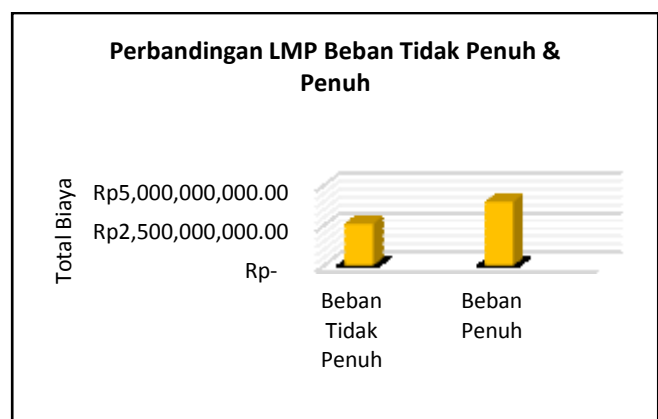
Metode MW-Mile reserve bisa dibilang metode yang paling *fair* dalam menentukan harga sewa transmisi dikarenakan metode MW-Mile reserve menerapkan sistem *pay* dan *reward* dalam perhitungannya.

C. Penerapan LMP

LMP ini diterapkan pada *Firm Transmission Right* (FTR). Pada skenario ini dijelaskan bahwa letak pembangkit tambahan berada pada bus 27 dan beban tambahan berada pada bus 42. Berdasarkan persamaan 13 dengan daya yang ditransferkan sebesar 104 MW, maka *net payment LMP* ialah:

Tabel 3
Biaya Payment LMP

No	Keadaan	Hari	Biaya (Rp)/MWh	Total Biaya (Rp)/MWh
1	Beban Tidak Penuh	Weekday	Rp 321,400.12	Rp 2,601,678,133.44
		Weekend	Rp 235,748.31	
2	Beban Penuh	Weekday	Rp 456,648.19	Rp 3,965,361,536.40
		Weekend	Rp 442,675.19	

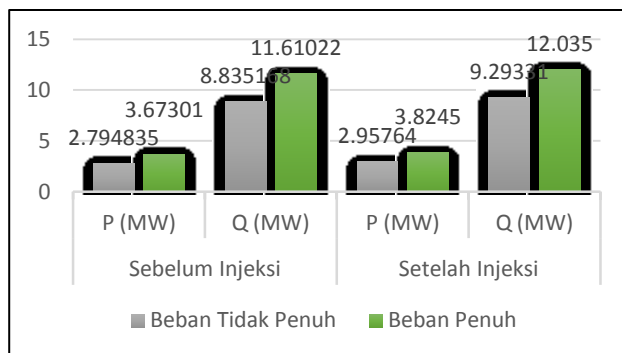


Gambar 5 Grafik Perbedaan Payment LMP

Nilai LMP27 dan LMP42 di atas adalah nilai LMP pada bus 27 dan bus 42 yang didapat dari hasil run *matpower5.0*. Nilai LMP masing masing bus berbeda dikarenakan adanya perbedaan batas saluran aliran daya yang dapat dilewatkan pada saluran tersebut. Nilai LMP juga dipengaruhi dengan besarnya nilai beban pada bus tersebut. Harga Biaya LMP pada saat beban penuh lebih besar dibanding nilai LMP pada saat beban tidak penuh. Harga Biaya LMP tersebut adalah nilai biaya kemacetan yang harus dibayar di setiap jamnya.

D. Perbandingan Perubahan Losses Sistem

Implementasi *Power Wheeling* menyebabkan perubahan losses sistem. Perbandingan losses sistem secara keseluruhan pada skenario yang diterapkan dapat dilihat pada gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 6 Grafik Perbandingan Losses Sebelum & Sesudah Injeksi Daya

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa *losses* daya aktif dan daya reaktif meningkat seiring dengan adanya injeksi daya. *Losses* daya aktif dan reaktif pada saat beban penuh lebih tinggi dibanding saat beban tidak penuh. Besarnya nilai total *losses* dapat dilihat dalam grafik di atas. Perubahan *losses* sistem dipengaruhi juga oleh letak pembangkit dan beban pada saat terjadi transaksi *Power Wheeling*.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi biaya sewa transmisi (*Power Wheeling*) karena injeksi daya di sistem 150 kV Krian – Gresik dapat ditarik kesimpulan :

1. Metode MW-Mile membutuhkan analisis aliran daya aktif, menggambarkan penggunaan jaringan yang sebenarnya.
2. Penggunaan *unused capacity* menjadikan metode MW-Mile sudah mencakup keseluruhan biaya karena mempertimbangkan kapasitas jaringan yang tidak digunakan.
3. Metode pendekatan MW-Mile reserve merupakan metode perhitungan paling fair bagi penyewa dan pemilik jaringan transmisi, karena biaya *Power Wheeling* sesuai dengan perubahan tingkat pembebanan saluran transmisi. Hal ini karena pada metode MW-Mile reserve menerapkan sistem *pay and reward* dalam perhitungannya.
4. Metode pendekatan MW-Mile Absolute menerapkan sistem *all pay* sehingga menjadikan metode yang paling mahal dibanding metode MW-Mile yang lain.
5. Metode pendekatan MW-Mile Dominant menerapkan prinsip *pay and release* sehingga

menjadikan metode ini kurang cocok diterapkan dikenyataannya karena tidak mempertimbangkan arah aliran daya negatif.

6. Implementasi *power wheeling* dengan asumsi arah aliran daya tambahan searah dengan arah aliran daya sistem (*dominant flow*) tidak selalu menyebabkan total *losses* jaringan bertambah besar. Perubahan nilai *losses* sistem dipengaruhi oleh letak pembangkit dan beban *Power Wheeling*.
7. LMP tidak ada unsur sewa transmisi, LMP hanya untuk menggantikan rugi rugi jaringan dan kenaikan biaya operasi karena perubahan *dispatch*.
8. Untuk dapat menggunakan metode penentuan biaya jaringan transmisi lain, PT. P3B JB perlu melakukan evaluasi terhadap data keuangannya sehingga data keuangan jaringan transmisi per segmen per satuan panjang jaringan transmisi dapat diketahui.

SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian yang terkait dengan kapasitas jaringan transmisi Jawa-Bali, untuk mengetahui saluran-saluran yang dapat digunakan dalam aplikasi *wheeling* tenaga listrik.
2. Perlu dilakukan penelitian tentang peletakan pembangkit tambahan yang optimal. Peletakan pembangkit agar *power wheeling* menjadi optimal ini memiliki beberapa tujuan. Pertama bertujuan agar mendapatkan biaya seminimal mungkin. Dan yang kedua adalah mendapatkan nilai *losses* sistem seminimal mungkin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zaenurijal, Ryan. 2014. *Penempatan Optimal Penyimpan Energi Pada Sistem Distribusi Dengan Pembangkit Tenaga Angin*. Tugas Akhir Pada FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [2] Dr. M. Al- Salamah, *Succesive Quadratic Programming Method for Constrained Problems*. Industrial Engineering KFUPM.
- [3] Shahidehpour. M., Yamin. H., Li. Z. 2002. *Market Operation in Electric Power System*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Ardialim, Achmad. 2014. *Studi penentuan tarif Power Wheeling menggunakan metode MVA-km pada sistem transmisi 500kV Jawa-Bali*. Skripsi pada FT Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- [5] Taufiq, I.S. juni 2014. *Studi Pemanfaatan Bersama Jaringan Transmisi Pada Sistem Transmisi Jawa-Bali*. Skripsi pada FT Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.